

А. Б. Бачурин, Е. С. Литвинов, Е. В. Стрельников, В. А. Целищев

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РДТТ

Представлена модель поддержания постоянного давления в камере сгорания РДТТ многократного включения с комбинированной электрогидравлической системой управления модулем тяги посредством управления площадью критического сечения сопла. *Ракетный двигатель твердого топлива, система управления, камера сгорания, сопло, рулевая машина*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ И СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ РДТТ

Вопрос целесообразности управления работой двигателя может возникать при разработке РДТТ практически любого класса и назначения. Во многих случаях выполнение задачи ракетной системой возможно без активного управления внутрикамерными процессами. Вместе с тем управление посредством ракетного двигателя является самым эффективным и мощным, а в не-которых случаях и единственно возможным способом [1]. Также следует отметить, что подавляющее большинство управляемых энергоустановок являются малогабаритными двигательными установками.

К ракетным двигателям твердого топлива (РДТТ) имеется практический интерес и это объясняется рядом преимуществ:

- простота конструкции двигателя и ракетной системы;
- простота эксплуатации и малое время подготовки двигателя к запуску;
- постоянная готовность к запуску в сочетании с возможностью длительного хранения двигателя;
- высокая надежность и безотказность двигателя, обусловленные главным образом простой конструкции.

Отмеченные преимущества предопределяют области применения РДТТ. Они могут использоваться на летательных аппаратах (ЛА) различного назначения, как стартовые и разгонные двигатели, а также как вспомогательные двигатели в системах управления и питания ЛА.

Одним из известных параметров регулирования ракетного двигателя твердого топлива является давление в камере сгорания p_k . Воздействие

на давление в камере РДТТ можно осуществлять с помощью критического сечения сопла, скорости горения, поверхности горения и др.

Системы регулирования по параметрам ракеты имеют в качестве регулируемой величины тягу двигателя, этот параметр определяет траекторию полета летательного аппарата. На ранних этапах использования РДТТ требования по стабильности тяги сравнительно легко удовлетворялись в силу их не слишком большой жесткости. Но со временем расширение области использования ракетных двигателей твердого топлива привело к необходимости усложнения систем их регулирования.

Современная ракетная двигательная установка твердого топлива представляет собой динамическую систему с комплексом взаимосвязанных звеньев, обеспечивающих в процессе ее функционирования на летательном аппарате получение заданных основных характеристик.

Недостаточные возможности эффективного контроля координат, определяющих работу двигательной установки, ограничивают выбор дополнительных регулируемых переменных. Современные технические средства не позволяют непосредственно измерять в процессе работы двигателя изменение как площади поверхности, так и скорости горения твердого топлива [2].

Для определения возможных способов воздействия на основной параметр РДТТ – тягу, необходимо рассмотреть зависимость ее величины от различных параметров двигателя.

Сила тяги РДТТ определяется формулой:

$$P = \dot{m} \omega_a + F_a (p_a - p_H), \quad (1)$$

где \dot{m} – массовый расход продуктов сгорания; F_a – площадь выходного сечения сопла; p_H – давление окружающей среды; p_a – давление продуктов сгорания на выходе из сопла; ω_a –

скорость истечения газа из сопла.

Секундный расход продуктов сгорания из сопла определяется

$$\dot{m} = A_n \mu_c \frac{p_k F}{\sqrt{RT_{oc}}}, \quad (2)$$

где μ_c – коэффициент расхода сопла; F – площадь критического сопла; p_k – полное давление продуктов сгорания в конце камеры (равное давлению торможения на входе в сопло);

$$A_n = \sqrt{n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n-1}}}. \quad (3)$$

Секундный газоприток вследствие сгорания основного заряда твердого топлива равняется

$$\dot{m} = \rho_s S u, \quad (4)$$

где ρ_s – плотность топлива; S – поверхность горения; u – скорость горения.

Примем степенную зависимость скорости горения от давления,

$$u = u_1 p_k^v, \quad (5)$$

где v – показатель степени в законе горения (определяется природой топлива), u_1 – коэффициент, зависящий от природы топлива, начальной температуры заряда и других параметров.

Система пяти линейных уравнений (1)–(5) позволяет найти следующие зависимости отклонения тяги двигателя δP от независимых переменных δF , δS , $\delta \dot{m}$, δu_1 , δF_a :

$$\delta P = \psi_1 \delta F + \psi_2 \delta u_1 + \psi_3 \delta S + \psi_4 \delta F_a, \quad (6)$$

где $\psi_1 \dots \psi_4$ функции параметров, характеризующих работу РДТТ, которые определяются решением системы (1)–(5) для условий номинального режима. Как видно из формулы (6), регулирование тяги РДТТ возможно при помощи изменения:

- площади критического сечения сопла F ;
- скорости горения топлива (коэффициента u_1 в законе скорости горения);
- поверхности горения S ;
- площади выходного сечения сопла F_a ;
- количества дополнительно вводимой в камеру массы некоторого рабочего тела;
- одновременно нескольких из отмеченных факторов.

Из вышеперечисленных методов регулирования тяги РДТТ отметим, что наиболее эффективными являются способы изменения поверхности горения S и площади критического сечения F [3]. Регулирование критическим сечением сопла можно осуществлять центральным телом. Различают механические системы управления и газодинамические. Реализованный диапазон устойчивого регулирования модуля тяги центральным телом, находится в пределах $3 \div 6$. Газодинамический способ регулирования исследован в меньшей степени. Достигнутый диапазон регулирования модуля тяги находится в пределах $1.7 \div 2$. Газодинамический способ имеет следующие недостатки: непроизводительные потери газа могут составлять $18 \div 25\%$ суммарного запаса топлива; необходимо вводить дополнительный источник рабочего тела управляющего канала, либо создавать перепад давления не менее 1.6 между управляющим и питающим потоками. Способ регулирования тяги изменением площади критического сечения сопла имеет следующие недостатки. При использовании твердых топлив с низкими значениями $v = (0.2 \div 0.3)$ расход продуктов сгорания имеет малую чувствительность к изменению площади критического сечения сопла при высокой чувствительности к изменению давления в камере сгорания. Использование топлив с $v = (0.7 \div 0.9)$ существенно ограничивает номенклатуру твердых топлив для данного способа регулирования.

Анализ динамики РДУ показывает, что задачи повышения быстродействия и устойчивости тесно связаны между собой, то есть вопрос повышения качества регулирования РДУ носит комплексный характер. Для повышения качества переходного процесса в двигательной установке на твердом топливе необходимо решить следующие задачи:

1) поддержание постоянного давления в камере сгорания РДТТ;

2) обеспечение качества регулирования в составе системы управления за счет высоких динамических свойств привода

Более подробно задачи регулирования РДТТ изложены в статье [4].

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РДТТ

Определим чувствительность тяги и давления в камере сгорания к изменению площади критического сечения сопла и дадим обобщен-

ные рекомендации пределов регулирования модуля тяги.

При степенном законе горения $u = u_1 p_k^v$ известна следующая зависимость для давления в камере сгорания:

$$p = \left(\frac{u_1 S \rho \sqrt{\chi R T_k} \cdot 1}{\varphi_c B(k) F_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-v}}. \quad (7)$$

Отсюда чувствительность давления к изменению площади критического сечения сопла может быть записана в виде:

$$\frac{dp}{p} = - \frac{1}{1-v} \cdot \frac{dF_{кр}}{F_{кр}}. \quad (8)$$

В интегральной форме уравнение (8) имеет следующий вид:

$$\frac{p}{p_o} = \left(\frac{F_{кр0}}{F_{кр}} \right)^{\frac{1}{1-v}}. \quad (9)$$

Аналогично для расхода продуктов сгорания, если пренебречь потерями полного давления по тракту, зависимость принимает вид:

$$\frac{m}{m_o} = \left(\frac{F_{кр0}}{F_{кр}} \right)^{\frac{v}{1-v}}. \quad (10)$$

Зависимость давления от расхода имеет вид:

$$\frac{p}{p_o} = \left(\frac{m}{m_o} \right)^{\frac{1}{v}}. \quad (11)$$

Анализ уравнения (11) показывает, что, например, при $v = 0,5$ для десятикратного изменения расхода продуктов сгорания необходимо изменение давления в 100 раз.

На рис. 1–7 представлены результаты параметрических исследований по оценке взаимовлияния v , p и $F_{кр}$ на глубину регулирования модуля тяги.

Были рассмотрены изменения показателя в степенном законе скорости горения в диапазонах $(0.1 \div 0.95)$ и $(-0.2 \div -3)$ и, соответственно, глубине регулирования в диапазонах $(1.5 \div 10)$ и $(15 \div 30)$. За основу при расчетах принимались два безразмерных параметра: отношение конечных давлений в камере сгорания к начальным p/p_o и отношение конечных площадей крити-

ческих сечений к начальным F/F_k при регулировании.

Основным недостатком способа регулирования модуля тяги РДТТ посредством изменения площади критического сечения сопла является значительное увеличение давления в камере сгорания при большой глубине регулирования тяги (>10).

Верхний уровень давления в камере сгорания ограничивается из соображений прочности конструкции и получения приемлемых массовых характеристик двигателя. Нижний уровень давления в камере сгорания определяется устойчивостью горения заряда твердого топлива.

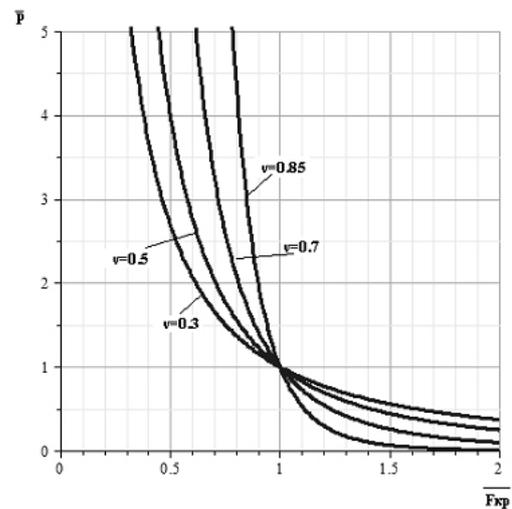


Рис. 1. Зависимость относительного давления в камере сгорания и тяги РДТТ от степени раскрытия сопла

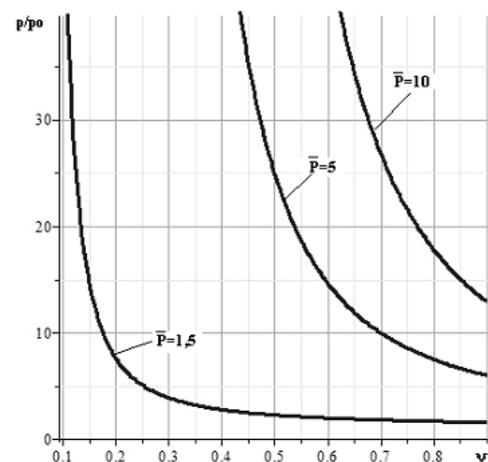


Рис. 2. Зависимость p/p_o относительно степенного показателя в законе горения v при разной глубине изменения тяги

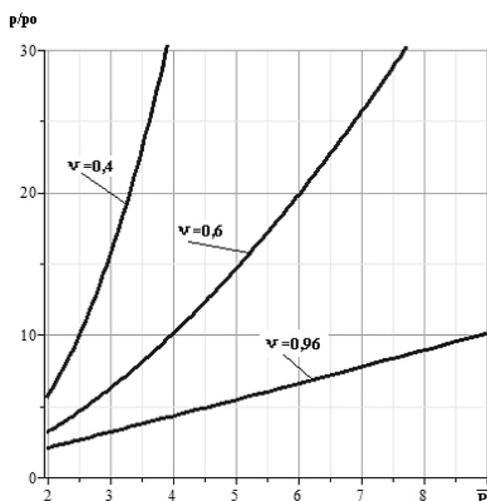


Рис. 3. Зависимость p/p_0 относительно глубины изменения тяги при разных положительных степенных показателях в законе горения

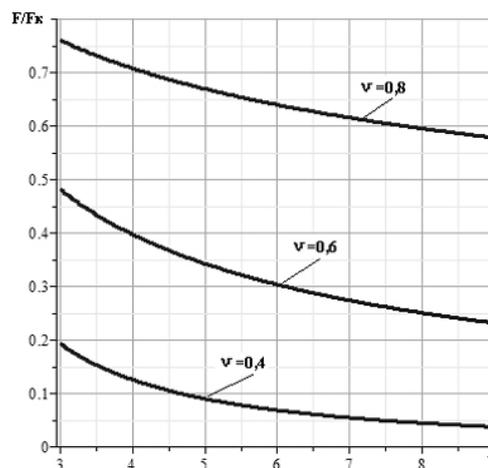


Рис. 6. Зависимость F/F_k относительно глубины изменения тяги при разных положительных степенных показателях в законе горения

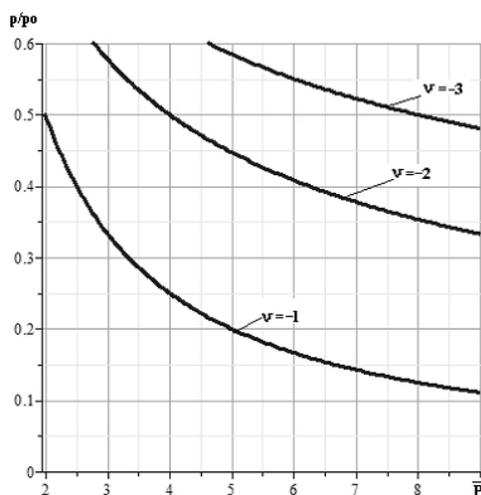


Рис. 4. Зависимость p/p_0 относительно глубины изменения тяги при разных отрицательных степенных показателях в законе горения

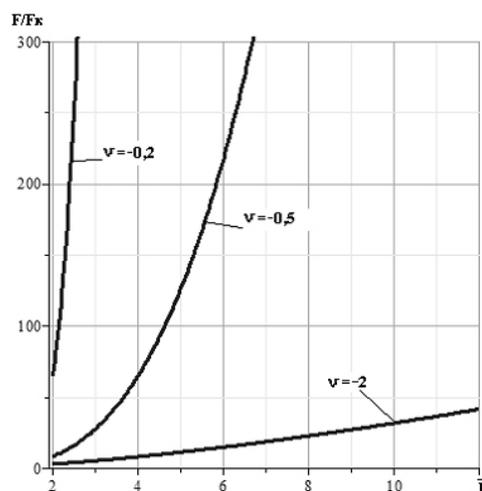


Рис. 7. Зависимость F/F_k относительно глубины изменения тяги при разных отрицательных степенных показателях в законе горения

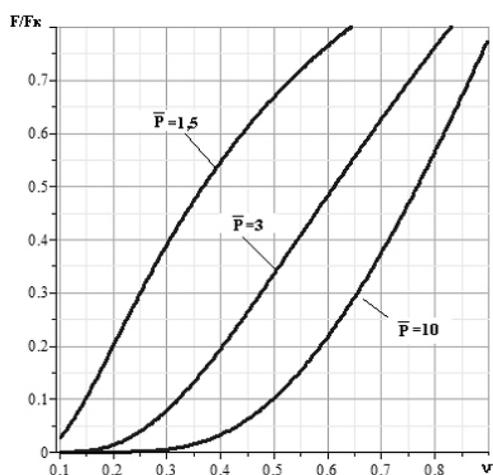


Рис. 5. Зависимость F/F_k относительно степенного показателя в законе горения ν при разной глубине изменения тяги

УРАВНЕНИЯ ДИНАМИКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Динамические модели процессов работы двигателя необходимы для разработки принципов построения систем управления тягой и расходом топлива РДТТ и твердотопливных газогенераторов (ТТГ), а также для выбора параметров, определяющих динамику управления.

Уравнения внутренней баллистики камеры сгорания РДТТ описывают изменение во времени основных параметров внутрикамерного процесса: давления, температуры, плотности

продуктов сгорания. При строгом подходе математическая модель газотермодинамических процессов в камере РДТТ предполагает интегрирование уравнений нестационарного трехмерного движения газа при определенных начальных и граничных условиях. Интеграл этих уравнений определяет изменение во времени локальных значений указанных параметров потока. Такой подход позволяет в принципе рассчитывать газодинамические параметры газа около горячей поверхности в случае любой геометрии. Реализация этого подхода очень непростая. В ряде случаев удовлетворительный результат получается решением упрощенной модели, построенной на осреднении газодинамических параметров по всему объему камеры.

В источнике [5] приведена математическая модель, описывающая внутрикамерные процессы системой из 5 уравнений относительно 5 неизвестных $\tilde{\rho}, \tilde{p}, \tilde{V}, \tilde{U}, \tilde{T}$:

- уравнение сохранения массы;
- уравнение сохранения энергии в камере сгорания;
- уравнение изменения свободного объема камеры сгорания;
- уравнение скорости горения;
- уравнение состояния.

$$V_k \frac{d\tilde{\rho}}{dt} = (\rho_s - \rho)S\tilde{U} - \frac{\mu_c A_n F_* \tilde{p}}{\sqrt{R\tilde{T}}};$$

$$V_k \frac{d\tilde{T}}{dt} = (\rho_s \chi_k \gamma T_{oc} - \tilde{T} \rho)S\tilde{U} - \frac{\mu_c A_n F_* \tilde{p} \tilde{T} \gamma}{\sqrt{R\tilde{T}}};$$

$$\frac{dV_k}{dt} = S\tilde{U};$$

$$\tilde{U} = U_1 \tilde{\rho}^{\nu};$$

$$\tilde{p} = \tilde{\rho} R \tilde{T}.$$
(12)

На рис. 8–10 приведены расчетные кривые переходных процессов в РДТТ при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла. Кривая 1 отражает упрощенную модель, построенную без учета массы продуктов сгорания, температура в камере сгорания постоянна. Кривая 2 учитывает массу продуктов сгорания, заполняющих объем выгоревшей части твердо-

го топлива. Кривая 3 построена на основании системы уравнений (12). Результаты расчета показывают, что при анализе РДТТ с изменяемой площадью критического сечения сопла как объекта регулирования допустимо использовать упрощенную математическую модель.

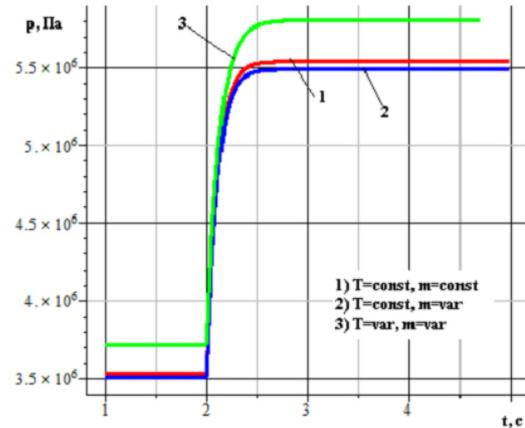


Рис. 8. Изменение давления в камере сгорания

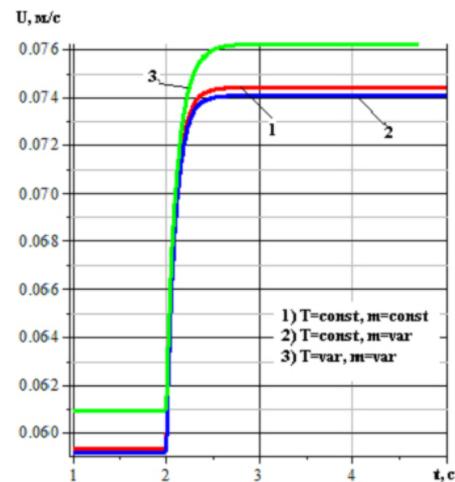


Рис. 9. Изменение скорости выгорания заряда твердого топлива

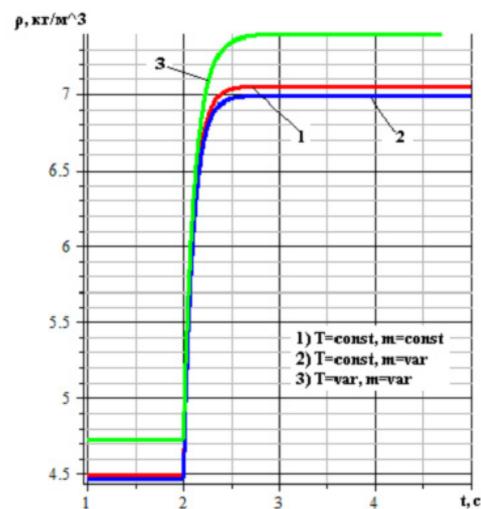


Рис. 10. Изменение плотности газов в камере сгорания

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ МЕХАНИЗМ – СТРУЙНАЯ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКАЯ РУЛЕВАЯ МАШИНА

Регулирование критическим сечением сопла можно осуществлять центральным телом. В современных системах гидроавтоматики управления летательных аппаратов в качестве исполнительных механизмов применяются электрогидравлические следящие приводы (ЭГСП) со струйной трубкой.

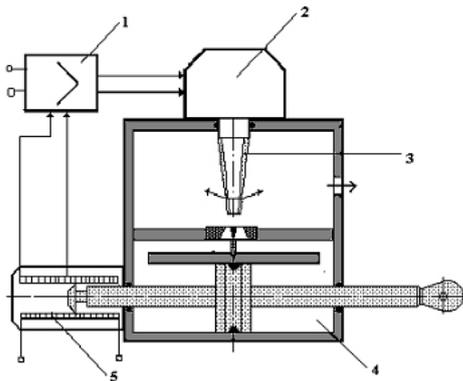


Рис. 11. Струйная электрогидравлическая рулевая машина:

- 1 – усилитель сигнала ошибки;
- 2 – электромеханический преобразователь;
- 3 – струйный гидроусилитель; 4 – гидроцилиндр;
- 5 – датчик обратной связи

Система дифференциальных уравнений СГРМ с высоконапорным струйным гидроусилителем [6] выглядит следующим образом:

- уравнение усилителя сигнала ошибки;
- уравнение обратной связи;
- уравнение электромеханического преобразователя;
- уравнение баланса расходов;
- уравнение движения гидродвигателя.

$$J_{ЭМн} \frac{d^2\alpha}{dt^2} = K_{М1}I - K_{Ма} - b_{ЭМн} \frac{d\alpha}{dt} - C_n\alpha;$$

$$R_{ЭМн}I + L \frac{dI}{dt} + K_{ПЭ} \frac{d\alpha}{dt} = (U_{ax} - k_{oc}P_{max})K_U;$$

$$\left(\frac{W_o + Ay}{E_i} + C_n\right) \frac{dp_d}{dt} + A \frac{dy}{dt} =$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{2}[(1+z)\sqrt{1-\frac{\bar{p}_d}{\xi_{pm}}} - (1-z)\sqrt{1+\frac{\bar{p}_d}{\xi_{pm}}}]npu & z \leq z_n \\ \sqrt{1-\frac{\bar{p}_d}{\xi_{pm}}}, & npu \quad z_{max} > z > z_n \end{cases}; \quad (13)$$

$$\begin{cases} M \frac{d^2y}{dt^2} = C_c(y - y_n) - b \frac{dy_n}{dt} - R - F_{tr} \\ m \frac{d^2y}{dt^2} = A p_d - b_p \frac{dy_n}{dt} - F_{tr_p} - C_c(y - y_n) \end{cases}$$

МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО РДТТ С ПОДСИСТЕМОЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Целью математического моделирования регулируемой РДУ является получение системы уравнений, описывающих работу структурно-подобных РДУ, дальнейшее исследование которой на ЭВМ позволяет решать задачи анализа и синтеза динамических параметров системы автоматического регулирования.

На рис. 12 представлена функциональная схема подсистемы регулирования в камере сгорания. В ее состав входит электронный усилитель сигнала ошибки (УСО), измеритель электрического сигнала рассогласования (Σ), электро-механический преобразователь (ЭМП), струйный гидроусилитель (СГУ), исполнительный гидродвигатель (ГЦ), датчик давления в камере сгорания (ДД) и объект регулирования (КС).

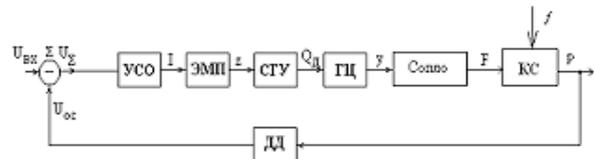


Рис. 12. Блок-схема регулятора

Математическая модель подсистемы регулирования давления в камере сгорания состоит их дифференциальных уравнений динамики камеры сгорания (12) и струйного гидроусилителя (13). Чтобы связать систему уравнений необходимо ввести функцию описывающую изменение площади критического сечения сопла от перемещения центрального тела, $F_* = f(y)$ (рис. 13). Исследования особенностей течения газа в регулируемых соплах представлено в работе [7].

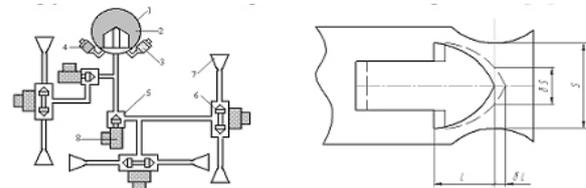


Рис. 13. Центральное тело с исполнительным механизмом:

- 1 – газогенератор; 2 – заряд; 3 – узел гашения;
- 4 – узел запуска; 5 – регулятор режима;
- 6 – клапан перепуска газа; 7 – сопловой блок;
- 8 – рулевая машина

На рис. 14–18 представлены графики переходных процессов в камере с учетом исполнительного механизма и без него.

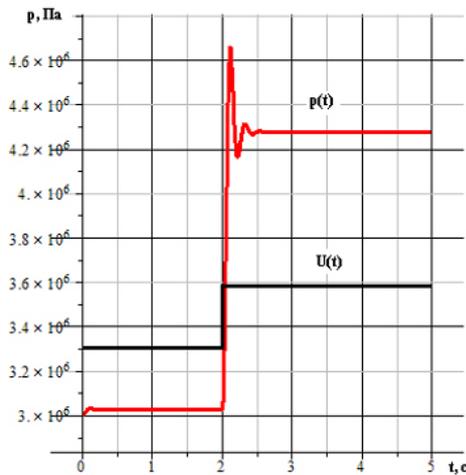


Рис. 14. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении задающего сигнала по напряжению

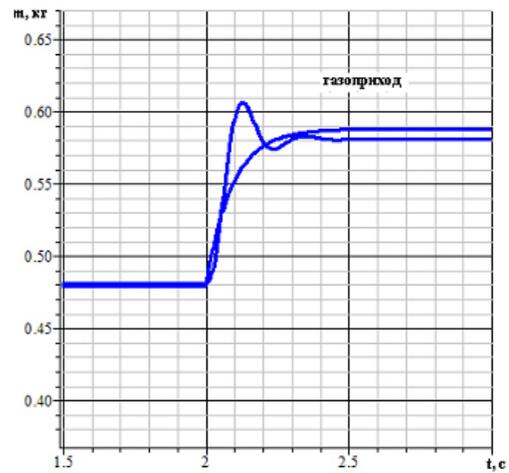


Рис. 17. Изменение газоприхода в камеру сгорания при изменении критического сечения сопла

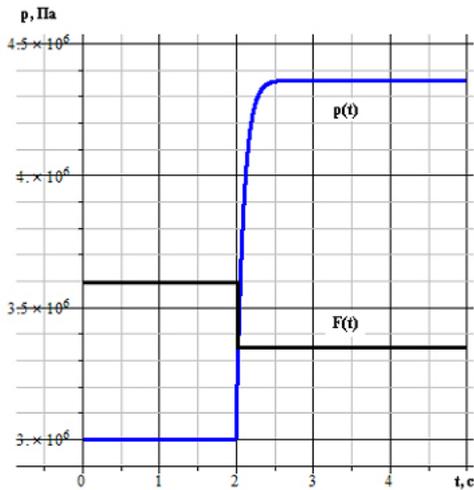


Рис. 15. Изменение давления в камере сгорания при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла

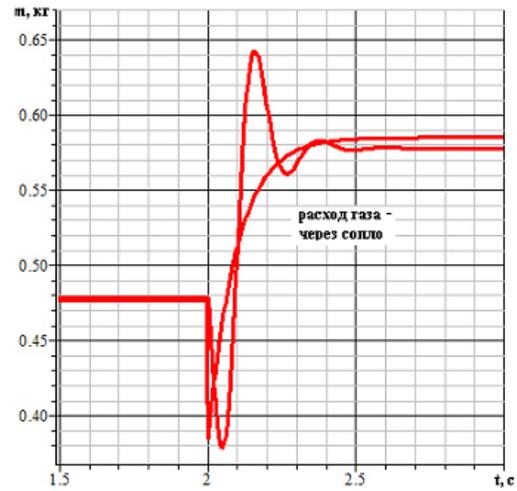


Рис. 18. Изменение расхода через сопло при изменении критического сечения сопла

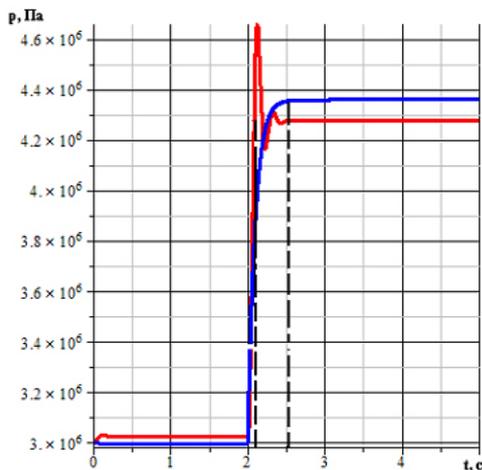


Рис. 16. Сравнение времени выхода на режим

Как видно из рис. 14–18, с применением электрогидравлического усилителя выход на режим осуществляется быстрее примерно на 0.5 с, чем при ступенчатом изменении площади критического сечения сопла, так как центральное тело зажимает критическое сечение до тех пор, пока давление не достигнет заданного значения, а не до заданного значения площади критического сечения сопла. В результате чего перемещение центрального тела сопла значительно превышает значения установившегося режима.

На рис. 19 показано как система поддержания постоянного давления обрабатывает возмущающее воздействие. Рассмотрено «нейтральное» горение, дающее постоянную или приблизительно постоянную площадь поверхности горения во времени. При постоянной площади

минимального сечения сопла давление в камере остается постоянным по времени. Это имеет место, например, при торцевом горении, при горении забронированной с торцов цилиндрической полой шашки по наружной и внутренней поверхностям. Для обеспечения горения, близкого к «нейтральному», применяются цилиндрические заряды с бронированной внешней поверхностью и сложной формой поперечного сечения: щелевые, звездообразные, колесообразные [8]. В момент времени $t = 2$ с ступенчато изменяем площадь поверхности горения, в результате чего происходит скачок давления в камере сгорания. Система обрабатывает заброс давления увеличением площади критического сечения сопла, после чего давление понижается до заданного значения.

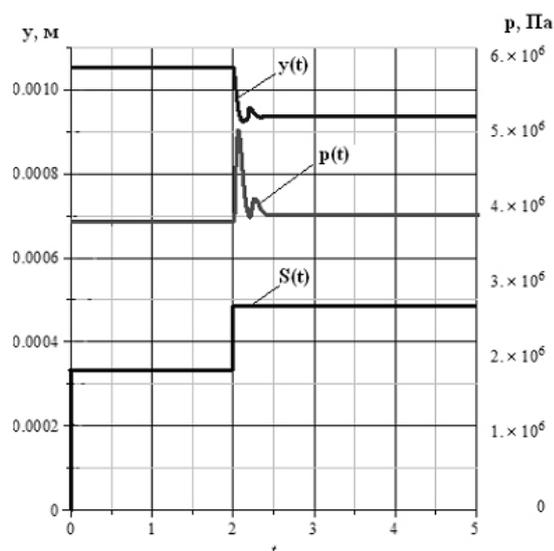


Рис. 19. Работа системы поддержания постоянного давления в камере сгорания

Систему поддержания постоянного давления в камере сгорания можно применять при комбинированной схеме управления модулем тяги РДТТ совместно с подсистемой «гидравлического» управления площадью поверхности горения заряда твердого топлива. Поддерживая давление на максимальном значении, которое ограничивается прочностными параметрами конструкции, можно регулировать газоприход и

тягу, изменением поверхности горения. Тем самым можно добиться увеличения глубины регулирования модуля тяги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе: под общ. ред. М. И. Соколовского и В. И. Петренко. М.: Машиностроение, 2003. 464 с.
2. Целищев В. А., Смородинов А. П. Ракетный двигатель твердого топлива многократного включения с двумя подсистемами регулирования // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 3–10
3. Петренко В. И., Попов В. Л., Русак А. М., Феофилактов В. И. РДТТ с регулируемым модулем тяги. Миасс: ГРЦ, 1994. 245 с.
4. Кривошеев И. А., Целищев В. А., Бачурин А. Б., Стрельников Е. В. Опыт разработки комбинированного РДТТ многократного включения // Вестник УГАТУ. Уфа, 2012. Т. 16, № 2 (47). С. 174–188.
5. Присняков В. Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1984. 248 с.
6. Месропян А. В., Целищев В. А. Моделирование гидравлических рулевых машин / под ред. А. В. Месропяна; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2008. 211 с.
7. Целищев В. А., Бачурин А. Б., Стрельников Е. В., Русак А. М. Экспериментальные и теоретические исследования в регулируемых соплах с центральным телом // Вестник УГАТУ. Уфа, 2010. Т. 14 № 5 (40). С. 52–61.
8. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.

ОБ АВТОРАХ

Бачурин Александр Борисович, аспирант каф. прикл. гидромех. Дипл. магистра (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двигательных установок.

Литвинов Евгений Сергеевич, аспирант той же каф. Дипл. магистра (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двигательных установок.

Стрельников Евгений Владимирович, аспирант той же каф. Дипл. магистра (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. систем управления ЛА и двигательных установок.

Целищев Владимир Александрович, проф., зав. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок.